

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ “ГЕТ”**Г.В. Аникин, К.А. Спасенникова***Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; anikin@ikz.ru, kspasennikova@gmail.com*

Выполнена оценка эффективности работы системы “ГЕТ” (сезонные горизонтальные естественно-трубчатые охлаждающие устройства), предназначенной для замораживания грунта в основаниях сооружений, построенных на вечной мерзлоте. Показано, что количество конденсаторов на стадии проектирования можно существенно сократить, что в значительной степени снизит затраты для заказчика.

Вечная мерзлота, стохастическое прогнозирование, грунт, сезонное охлаждающее устройство, конденсатор

**ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS
OF “HET” SYSTEM FOR SOIL TEMPERATURE STABILIZATION****G.V. Anikin, K.A. Spasennikova***Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS,
86, Malygina str., Tyumen, 625000, Russia; anikin@ikz.ru, kspasennikova@gmail.com*

Assessment of effectiveness of “HET” system (seasonal horizontal natural tube cooling unit) designed to freezing soil in the foundations of structures built on permafrost has been evaluated. This research has demonstrated that the number of condenser units can be reduced that would result in significant lower customer costs.

Permafrost, stochastic forecasting, soil, thermosyphon, condenser

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетнюю практику использования сезонных охлаждающих устройств типа “ГЕТ”, имеется множество нерешенных вопросов, связанных с оценкой эффективности их работы. Оценка эффективности работы системы “ГЕТ” в зависимости от количества конденсаторов и расстояния между трубами испарительной системы ранее не производилась. В связи с этим авторами выполнено компьютерное моделирование системы “ГЕТ” с помощью программы Stochastic-3D для определения оптимального количества конденсаторов и расстояния между трубами испарительной системы, а также для выявления экономической выгоды.

Данная работа является продолжением ранее начатых авторами исследований горизонтальной естественно действующей трубчатой системы “ГЕТ” под нефтяным резервуаром в пос. Ванкор [Аникин, Спасенникова, 2012; Долгих и др., 2015; Аникин и др., 2017а–в]. В [Спасенникова, 2015] подробно описана разработанная методика стохастического прогнозирования, особенностью которой является возможность вычислить вероятность нахождения грунта в талом состоянии в любой точке расчетной сетки. В целом эта методика позволяет провести оценку эффективности работы системы “ГЕТ”.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделируемая система охлаждения приведена на рисунке. Она состоит из определенного числа конденсаторных блоков с расстоянием между трубами испарительной системы l_x . Расчет проводился для 10, 7, 4, 1 и при отсутствии конденсаторов системы “ГЕТ” (производства НПО “Фунда-

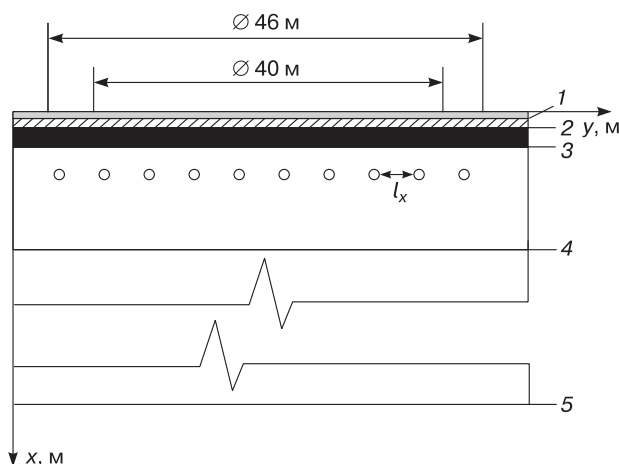


Схема расположения системы охлаждения под основанием резервуара.

1 – гидрофобный слой; 2 – песок средней крупности; 3 – пеноплекс; 4 – насыпной песок; 5 – супесь.

Таблица 1. Теплофизические свойства насыпного песка и супеси в талом и мерзлом состоянии

Грунт	Температуропроводность, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$		Теплопроводность, Вт/(м·К)		Влажность, W	Объемная плотность скелета грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$
	$a_{\text{мерз}}$	$a_{\text{тал}}$	$\lambda_{\text{мерз}}$	$\lambda_{\text{тал}}$		
Песок	0.67	0.66	2.0	1.14	0.25	1620
Супесь	0.46	0.40	1.4	1.02	0.75	1400

ментстройаркос”) с площадью оребренной поверхности 100 м^2 , а значения l_x принимались равными 0.5, 1.0 и 1.5 м. Суммарная длина всех труб испарительной системы под резервуаром с шагом укладки 0.5 м составляет 3214 м, с шагом 1 м – 1606 м, с шагом укладки 1.5 м – 1054 м.

Для расчета принималось, что выемка грунта под резервуаром заполнена следующими слоями: 1) гидрофобный слой (толщиной 0.28 м, $\lambda = 0.93 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$); 2) слой песка средней крупности (толщиной 0.12 м, $\lambda = 1.56 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$); 3) слой пе-

Таблица 2. Значения координаты y_i (м), при которых вычисляется вероятность нахождения грунта в талом состоянии (Wm_i)

i	y_i	i	y_i
0	17	12	53
1	20	13	56
2	23	14	59
3	26	15	62
4	29	16	65
5	32	17	68
6	35	18	71
7	38	19	74
8	41	20	77
9	44	21	80
10	47	22	83
11	50		

ноплекса (толщиной 0.45 м, $\lambda = 0.041 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), где λ – коэффициент теплопроводности. Ниже слоя пеноплекса находится слой насыпного песка толщиной 4 м, а в нем на расстоянии 1.2 м от ниж-

Таблица 3. Вероятность нахождения грунта в талом состоянии (Wm_i) в зависимости от количества конденсаторов (N) в системе “ГЕТ” и от расстояния между трубами испарительной системы (l_x)

$y_i, \text{ м}$	$Wm_i, \%$	$l_x, \text{ м} (N = 10)$			$l_x, \text{ м} (N = 7)$			$l_x, \text{ м} (N = 4)$			$l_x, \text{ м} (N = 1)$			$N = 0$
		0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	
		$d_x, \text{ м}$			$d_x, \text{ м}$			$d_x, \text{ м}$			$d_x, \text{ м}$			
		321.4	160.6	105.4	459.1	229.4	150.6	803.5	401.5	263.5	3214	1606	1054	
y_0	Wm_0	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
y_1	Wm_1	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
y_2	Wm_2	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
y_3	Wm_3	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.9
y_4	Wm_4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
y_5	Wm_5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.6	0.8	1.2	100
y_6	Wm_6	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5	0.2	0.4	0.8	1.8	2.8	4.0	100
y_7	Wm_7	0.1	0.3	0.8	0.2	0.4	0.9	0.3	0.6	1.3	2.5	3.9	5.3	100
y_8	Wm_8	0.2	0.4	0.9	0.2	0.5	1.1	0.4	0.7	1.6	2.7	4.3	5.7	100
y_9	Wm_9	0.2	0.4	1.0	0.2	0.5	1.1	0.4	0.8	1.7	2.8	4.4	5.8	100
y_{10}	Wm_{10}	0.2	0.4	1.0	0.2	0.5	1.1	0.4	0.8	1.7	2.8	4.5	5.8	100
y_{11}	Wm_{11}	0.2	0.4	1.0	0.2	0.5	1.1	0.4	0.8	1.7	2.8	4.5	5.9	100
y_{12}	Wm_{12}	0.2	0.4	1.0	0.2	0.5	1.1	0.4	0.8	1.7	2.8	4.5	5.8	100
y_{13}	Wm_{13}	0.2	0.4	1.0	0.2	0.5	1.1	0.4	0.8	1.7	2.8	4.4	5.8	100
y_{14}	Wm_{14}	0.2	0.4	0.9	0.2	0.5	1.1	0.4	0.7	1.6	2.7	4.3	5.7	100
y_{15}	Wm_{15}	0.1	0.3	0.8	0.2	0.4	0.9	0.3	0.6	1.4	2.5	3.9	5.3	100
y_{16}	Wm_{16}	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.6	0.2	0.4	0.8	1.8	2.8	4.0	100
y_{17}	Wm_{17}	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.6	0.8	1.2	100
y_{18}	Wm_{18}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
y_{19}	Wm_{19}	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.9
y_{20}	Wm_{20}	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
y_{21}	Wm_{21}	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
y_{22}	Wm_{22}	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8

Примечание. d_x – суммарная длина труб испарительной системы.

ней кромки пеноплекса расположены трубы испарителей. Под слоем песка находится супесь толщиной 6 м.

Теплофизические свойства насыпного песка и супеси приведены в табл. 1.

Расчет выполнялся на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра. Далее проводилась оценка состояния грунта по полученным 48 температурным полям, расчет которых дан в работах [Долгих и др., 2015; Спасенникова, 2015; Мельников и др., 2019].

Вероятность найти температуру больше T_{bf} в точке с номером i на оси, параллельной днищу резервуара, с координатами $x = 0.7$ м, $y = y_i$ м ($0 \leq i \leq 22$), $z = 50$ м задается выражением

$$Wm_i = \int_{T_{bf}}^{+\infty} \frac{\exp\left(-\frac{(t - \bar{t}_i)^2}{2\bar{\sigma}_i^2}\right)}{\bar{\sigma}_i \sqrt{2\pi}} dt \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\bar{t}_i = \sum_{k=1}^{48} \frac{t_{k,i}}{48}, \quad \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{48} \frac{(t_{k,i} - \bar{t}_i)^2}{48}},$$

где $t_{k,i}$ – значение температуры в точке i на оси, параллельной днищу резервуара, для варианта развития событий с номером k ; T_{bf} – температура фазового перехода; t – значения температуры, °С (в интервале от T_{bf} до $+\infty$), вероятность нахождения которой находим в узле i ; \bar{t}_i , $\bar{\sigma}_i$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение температуры грунта в узле i . Величины y_i приведены в табл. 2.

Проводя вычисления по формуле (1), получаем результаты для Wm_i ($0 \leq i \leq 22$) (табл. 3).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее в [Спасенникова, 2015] предлагался способ оценки эффективности работы системы “ГЕТ”: если вероятность нахождения грунта в талом состоянии там, где он должен быть мерзлым, находится в пределах $0.1\% \leq Wm \leq 5\%$, то система “ГЕТ” оптимальна; если $Wm > 5\%$, то в системе недостаточно охлаждающих элементов; если $Wm < 0.1\%$, то система избыточна, следовательно, количество охлаждающих элементов можно уменьшить в целях экономии.

Из табл. 3 следует, что вероятность найти грунт в талом состоянии даже при одном конденсаторе с расстоянием между трубами испарительной системы 1 м составляет 4.5 %, согласно нашей системе градации, моделируемая система “ГЕТ” является оптимальной. В качестве теста был проведен расчет при отсутствии конденсаторов системы “ГЕТ”. Приведенный в последнем столбце табл. 3 результат этого расчета показывает стопроцентную вероятность нахождения грунта в талом состоянии, что говорит о корректности работы компьютерной программы Stochastic-3D.

В реальной системе сотрудники НПО “Фундаментстройаркос” устанавливают на объекте 10 конденсаторных блоков, подробное описание этой системы приведено в [Аникин, Спасенникова, 2012; Долгих и др., 2015; Аникин и др., 2017а–в]. В данной работе показано, что на практике можно ограничиться одним конденсатором с длиной трубы испарителя 3214 м и с шагом укладки труб 0.5 м. Таким образом, выполненная оценка эффективности работы системы “ГЕТ” позволит существенно снизить затраты заказчика на стадии проектирования.

Работа выполнена по госзаданию, согласно Плану НИР ТюмНЦ СО РАН на 2018–2020 гг., протокол № 2 от 08.12.2017 г. (Приоритетное направление IX.135. Программа IX.135.2. Проект: IX.135.2.4. Физико-механические и физико-химические модели эволюции состояния природно-технических систем в криосфере Земли).

Литература

- Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 60–64.
- Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Ишков А.А., Плотников С.Н. Усовершенствование метода стохастического прогнозирования работы горизонтальной естественно действующей трубчатой системы // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2017а, № 6, с. 30–34.
- Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Плотников С.Н., Ишков А.А. Метод стохастического прогнозирования нахождения температуры грунтов с помощью систем “ГЕТ” // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2017б, № 1, с. 35–40.
- Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Плотников С.Н. и др. Вычисление распределений температуры в грунте, охлаждаемом системой “ГЕТ”, методом стохастического прогнозирования // Криосфера Земли, 2017в, т. XXI, № 4, с. 23–28.
- Долгих Г.М., Аникин Г.В., Рило И.П., Спасенникова К.А. Статистическое моделирование работы системы “ГЕТ”, установленной в основании нефтяного резервуара // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, с. 70–77.
- Мельников В.П., Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Стохастическое прогнозирование работы сезонных охлаждающих устройств под основанием резервуара с нефтью на Варандейском месторождении // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 63–71.
- Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепло-массопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2015, 19 с.

References

- Anikin G.V., Spasennikova K.A. Computer modelling of the ground cooling system under the oil-tank. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2012, vol. XVI, No. 2, p. 60–64 (in Russian).
- Anikin G.V., Spasennikova K.A., Ishkov A.A., Plotnikov S.N. Improving the stochastic forecasting method of a naturally-

acting horizontal tubular system. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, vol. 54, No. 6, p. 414–419.

Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Ishkov A.A. Method of stochastic prediction of soil temperatures with GET systems. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, No. 1, p. 65–70.

Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Grigoriev B.V., Mikhailov P.Y. Temperature distribution in soil cooled with an HET thermosyphon system: Prediction by stochastic analysis. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 4, p. 19–23.

Dolgikh G.M., Anikin G.V., Rilo I.P., Spasennikova K.A. Statistical modelling of "GET" system installed at the base of oil reservoir. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 1, p. 61–68.

Melnikov V.P., Anikin G.V., Spasennikova K.A. Operation of thermosyphons beneath an oil tank at the Varandey field: prediction by stochastic analysis. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, vol. 1, p. 54–61.

Spasennikova K.A. Комп'ютёрное моделирование тепломассопереноса в грунтах под сооруже́ниями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств [Simulation of heat and mass transfer in soils under structures on permafrost stabilized by thermosyphons]. Author's Abstract. Candidate Sci. (PhD) Thesis (Engineering). Tyumen, 2015, 19 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 5 февраля 2020 г.,
после доработки – 22 июня 2020 г.,
принята к публикации 13 июля 2020 г.*